

ภาคผนวก  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ISSN 0125-1724



LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

# วิศวกรรมลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีที่ 28 ฉบับที่ 1

ปีพฤษภาคม 2554

## วิศวกรรมโทรคมนาคม

1. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นชนิดเรียงตรงในรูปแบบวงจรรวมซีมอส  
ปัตถณวิชญ์ ภัทรธรรมศิริ มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ 1
2. วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์โหนดกระแสโดยใช้ CCCCTA เพียงตัวเดียว  
ผาณิต ละมุล มนตรี คำเงิน ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ กอบชัย เดชหาญ 7

## วิศวกรรมไฟฟ้า

3. การพัฒนาต้นแบบวงจรขับเคลื่อนอินพุตพัลส์ดีเพิลเอ๊าท์พุทแบบรวมวงจรรีเลย์แบบเคอร์รี่  
ปรัชญา สัตยารักษ์ กุสุมาลย์ เจลินยานนท์ ณัฏฐา จินดาเพชร 13

## วิศวกรรมเครื่องกล

4. การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของปล่องหลังคาโซลาร์เซลล์ระบายอากาศแบบธรรมชาติ  
ร่วมกับพัดลมกระแสตรงภายใต้สภาวะอากาศของกรุงเทพมหานคร  
ปรีดา จันทร์หงษ์ 19

## วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

5. การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้ว  
โลหะโปร่งใส  
สุรศักดิ์ เนียมเจริญ 25
6. ผลกระทบของการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น  
สุรดา เอี่ยมานะพงษ์ อิศระ ศรีอินชัย สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อัมพร โพธิ์ไธ 31

## วิศวกรรมอุตสาหกรรม

7. การศึกษากิจกรรมใช้อุปทานแบบยืดหยุ่นต่อสมรรถนะขององค์กร : กรณีศึกษากลุ่มผู้ผลิต  
จีนส่วนขยายประเทศไทย  
ทศพล เกียรติเจริญผล ธนพล ประเสริฐผล 37
8. การลดพฤติกรรมเสี่ยงของพนักงานด้วยหลักพฤติกรรมความปลอดภัย กรณีศึกษา โรงงานผลิต  
อะไหล่และประกอบนาฬิกา  
ศิริพร เข้มทอง สิทธิพร ทิมพัสกุล 43
9. การศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดตั้งโรงงานผลิตถ่านกะลามะพร้าวอัดแห้งในจังหวัด  
ประจวบคีรีขันธ์  
รักษ์ ผิวฉิม สิทธิพร ทิมพัสกุล 49

## วิศวกรรมเคมี

10. การสร้างแบบจำลองศึกษาการระบายอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์  
อัศวินวิญญ์ เมื่อนภาโพธิ์ สุรัตน์ อารีรัตน์ 55

# Optical Response of MSM Structure Photodetector Using Indium Tin Oxide as Transparent Electrodes

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวัดการตอบสนองทางแสงแบบกระแสสลับ (ac) ในช่วงความถี่ต่ำ (1 kHz-2 MHz) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดอื่น โดยใช้อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต จากการศึกษาการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO จะมีค่าลดลง เมื่อให้ความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น เนื่องจากความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่มีค่ามากขึ้น โดยพบว่า ตัวตรวจวัดแสงที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเป็น 20, 40, 60 และ 80  $\mu\text{m}$  จะทำให้ความถี่คutoff มีการเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz และ 90 kHz ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** ตัวตรวจวัดแสงแบบสารกึ่งตัวนำ; ซิลิคอนโฟโตไดโอด; โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ; อินเดียมทินออกไซด์/อินเดียมทินออกไซด์; ซิลิคอน/อินเดียมทินออกไซด์; ซิลิคอนโฟโตไดโอด

## Abstract

This paper reported the alternating current (ac) characteristics on low frequency (1 kHz-2 MHz) optical response of the n-silicon based metal-semiconductor-metal (MSM) structure photodetectors using indium tin oxide (ITO) as the interdigitated transparent electrodes. The experimental results showed that as the electrode width increased, the optical response of ITO/n-Si/ITO was reduced because the contact capacitance increased. The changing electrode widths of ITO/n-Si/ITO photodetectors were 20, 40, 60 and 80  $\mu\text{m}$ , the cutoff frequencies were 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz and 90 kHz, respectively.

**Key words :** Semiconductor photodetector; Silicon Photodetector; Metal-semiconductor-metal; ITO/n-Si/ITO; Schottky Photodiode

## 1. บทนำ

ฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide) หรือฟิล์ม ITO เป็นสารกึ่งตัวนำแบบดีเจเนอเรต ชนิดเอ็น (n-type degenerate semiconductor) ที่มีช่องว่างแถบ

พลังงานกว้าง (~ 3.8 eV) [1] และด้วยการเจือดีบุก (tin: Sn) เข้าไปในอินเดียมออกไซด์ ทำให้ฟิล์ม ITO มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ( $\approx 10^{-3}$ - $10^{-4}$   $\Omega\text{-cm}$ ) [2, 3] และมีความโปร่งใสสูง แสงสามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์ม ITO ได้ดี

(มากกว่า 85% [2]) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด ดังเช่น ใช้สร้างในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronic devices), ทรานซิสเตอร์แบบฟิล์มบางที่สร้างส่วนเกตด้วยสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric-gate thin film transistor) และอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic devices) [4-6] เป็นต้น ถึงแม้ว่าวัสดุที่ใช้สร้างขั้วโลหะโปร่งใสจะมีหลายชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), แกลเลียมออกไซด์ (CdO) และแกลเลียมอินเดียมออกไซด์ (GaInO<sub>3</sub>) เป็นต้น แต่วัสดุโปร่งใส ITO กลับได้รับความสนใจมากกว่าวัสดุโปร่งใสชนิดอื่น ๆ เพราะว่า แสงในช่วงที่ตามองเห็นสามารถทะลุผ่านได้ดี, มีราคาถูก และสามารถยึดเกาะกับซิลิคอน หรือซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี ส่วนกระบวนการสร้างฟิล์ม ITO สามารถสร้างได้หลายวิธี เช่น การระเหยในสุญญากาศ, การสเปคเตอร, การจุ่ม และการพ่น เป็นต้น นอกจากนี้รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างซิลิคอนกับฟิล์มบาง ITO ยังเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคติคัล ทำให้สามารถสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้หลายชนิด ดังเช่น โซลาร์เซลล์ [6], ตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ [7] และตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ [8]

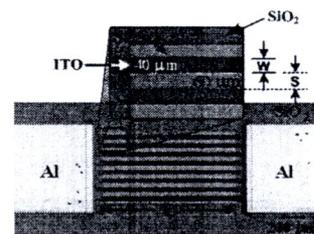
ในบทความนี้นำเสนอการศึกษาการตอบสนองทางแสงแบบกระแสสลับ (ac optical response) ในช่วงความถี่ ตั้งแต่ 1 kHz ถึง 2 MHz ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตที่สร้างขึ้นบนแผ่นฐานรองซิลิคอน ชนิด n โดยใช้ฟิล์มบาง ITO ทำหน้าที่เป็นขั้วโลหะโปร่งใส

## 2. การเตรียมชิ้นงาน

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO เริ่มต้นโดยนำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด n ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) 5-10  $\Omega$ -cm ระบายผิวหน้าผลึก (100) ความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400  $\mu\text{m}$  มาทำความสะอาด จากนั้นนำไปสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) หนา 400 nm แล้วเปิดชั้น SiO<sub>2</sub> เพื่อสร้างเป็นส่วนรับแสง และรอยสัมผัสระหว่างชั้น ITO กับแผ่นซิลิคอน (ITO/n-Si) ด้วยกระบวนการโฟโตลิ

โกราฟี สำหรับฟิล์มบาง ITO สร้างจากเครื่องอาร์เอฟ สเปคเตอร (SPF-210 RF sputtering system ของบริษัท Anelva Corporation โดยใช้ความถี่วิทยุ 13.56 MHz) ที่ใช้กำลังไฟฟ้า 100 W ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่มีความดันภายในห้องสเปคเตอร  $4 \times 10^{-3}$  Pa โดยฟิล์มบาง ITO มีความหนาประมาณ 500 nm (อัตราการผลิตฟิล์ม ITO 16 nm/นาที) จากแผ่นอินเดียมทินออกไซด์บริสุทธิ์ (99.99% ของบริษัท Kurt J. Leskar) ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง 90 wt% In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> กับ 10 wt% SnO<sub>2</sub> ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 cm (ฟิล์มบาง ITO จากการสเปคเตอรไม่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนระหว่างการสร้าง และหลังจากการสร้างฟิล์ม) จากนั้นสร้างลวดลายโลหะอลูมิเนียม (Al) ด้วยเทคนิคการระเหยในสุญญากาศ เพื่อสร้างเป็นส่วนเชื่อมต่อภายนอก ในรูปที่ 1 เป็นตัวอย่างชิ้นงานของ MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สร้างเสร็จแล้ว

จากนั้นจึงนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว ไปวัดสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงต่อไป การทดลองในบทความนี้ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง



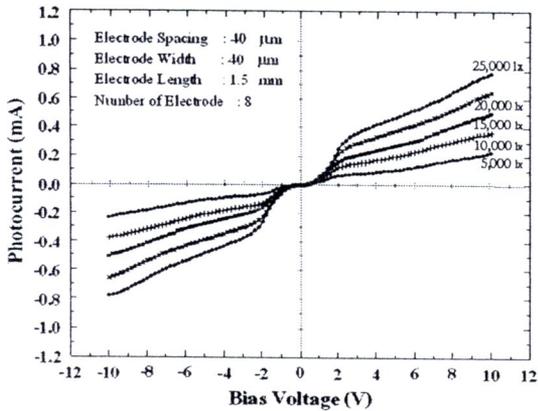
รูปที่ 1 ตัวตรวจวัดแสงแบบอินเตอร์ดิจิต ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สร้างเสร็จแล้ว โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) = 60  $\mu\text{m}$ , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) = 40  $\mu\text{m}$ , ความยาวของขั้วไฟฟ้า (L) = 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า หรือ ฟิงเกอร์ (N) = 8 ขั้ว

## 3. การทดลอง และผลการทดลอง

### 3.1 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันกับความเข้มแสง

ในรูปที่ 2 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน (I-V) เพื่อหากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ (จากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้น สามารถตอบสนองต่อแสงแบบกระแสตรงได้เป็นอย่างดี [8] โดย

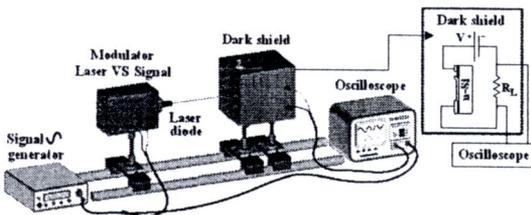
กระแสมีค่าน้อย (ประมาณ  $1.5 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$ ) กระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น สำหรับอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมีค่าค่อนข้างสูง ( $I_{\text{photo}}/I_{\text{dark}}$ ) ดังเช่น ที่ความเข้มแสง  $25,000 \text{ lux}$  ให้แรงดันไบอัส  $5 \text{ V}$  กระแสแสงต่อกระแสมีค่าประมาณ  $1,400$  เท่า



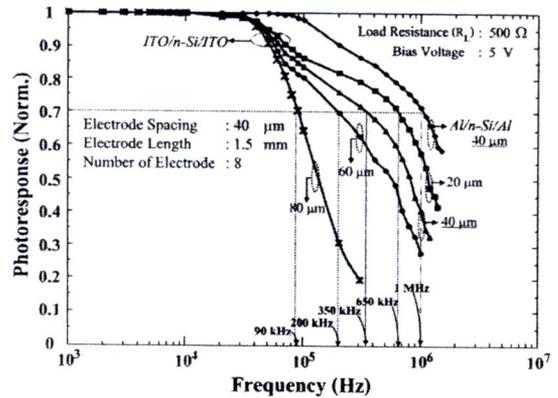
รูปที่ 2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ

3.2 การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง

เพื่อหาการตอบสนองทางแสง ทำการต่อวงจรดังในรูปที่ 3 โดยใช้แหล่งจ่ายแสงจากเลเซอร์ไดโอด ความยาวคลื่น  $670 \text{ nm}$  กำลังงาน  $2.67 \text{ mW}$  และทำการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์เข้ากับเลเซอร์ไดโอดด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ จากนั้นฉายแสงไปยังตัวตรวจวัดแสงที่ถูกต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน  $500 \Omega$  และป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ  $5 \text{ V}$  แล้ววัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป ขณะป้อนสัญญาณความถี่ค่าต่าง ๆ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 3 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาการตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทานโหลด ( $R_L$ ) เป็น  $500 \Omega$  และแรงดันไบอัส (V) กับอุปกรณ์ MSM เท่ากับ  $5 \text{ V}$

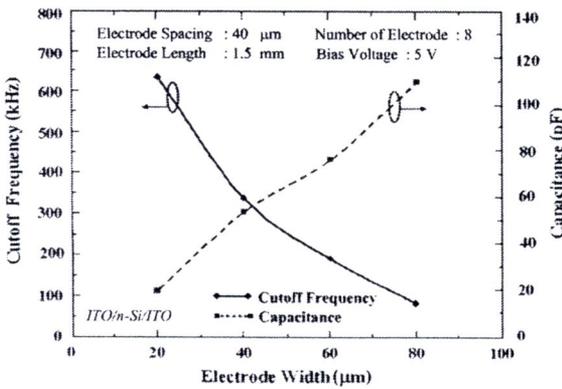


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสง (ซึ่งถูกนอร์มอลไรซ์) กับความถี่ ในช่วง  $1 \text{ kHz}$ - $2 \text{ MHz}$  ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่เปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่  $20 - 80 \mu\text{m}$

ในบทความที่เคยนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) มีค่ามาก (ระยะ  $S > 20 \mu\text{m}$ ) เมื่อให้ความเข้มแสง และแรงดันไบอัสแก่ MSM คงที่ค่าหนึ่ง (ยังคงเหลือบริเวณนิวทรัล) ถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนแปลงระยะ S เพิ่มขึ้น กระแสแสง [9, 10] และการตอบสนองทางแสง [9] ยังคงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบกับการตอบสนองความถี่จึงเป็นความกว้างของขั้วไฟฟ้า (โดยให้ความยาวและจำนวนของขั้วไฟฟ้ามีค่าคงที่) ดังแสดงในรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่า เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น  $20, 40, 60$  และ  $80 \mu\text{m}$  จะทำให้ความถี่คัทออฟมีการเปลี่ยนแปลงจาก  $650 \text{ kHz}, 350 \text{ kHz}, 250 \text{ kHz}$  และ  $90 \text{ kHz}$  ตามลำดับ กล่าวคือความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าลดลง เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่ของรอยสัมผัส ดังนั้นเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้น จากการวัดความจุไฟฟ้าของ ITO/n-Si/ITO ด้วยเครื่อง HP 4284A (ที่แรงดันไบอัส  $5 \text{ V}$ ) ความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าเป็น  $19, 55, 79$  และ  $114 \text{ pF}$  ที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้า  $20, 40, 60$  และ  $80 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสนั้นก็มีความสัมพันธ์แปรผกผันกับการ

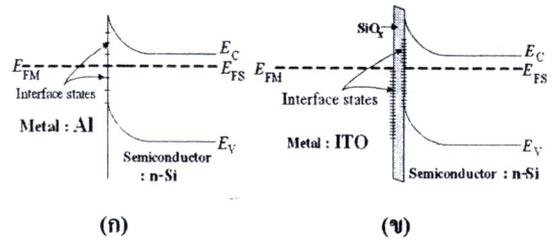
ตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง กล่าวคือเป็นส่วนหนึ่งของค่าเวลาคงตัว (RC time constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความต้านทานโหลด ( $R_L$ ) กับค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสต่าง ๆ ของตัวตรวจวัดแสง MSM (รวมถึงที่บริเวณขั้วเชื่อมต่อสาย) ดังนั้นเมื่อความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คutoff และความจุไฟฟ้ากับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ในช่วง 20 - 80  $\mu\text{m}$

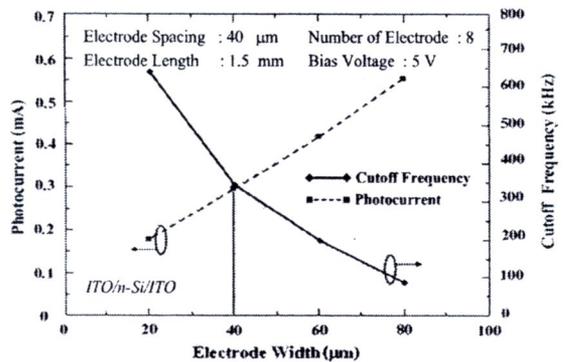
เมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO กับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al (ขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง) ที่มีขนาดเดียวกัน (ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40  $\mu\text{m}$ , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40  $\mu\text{m}$ , ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และมีจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว) และสร้างขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 เห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าความถี่คutoffเท่ากับ 350 kHz โดยมีความถี่คutoffต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีความถี่คutoffเท่ากับ 1 MHz เนื่องจากความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al เนื่องจากที่รอยสัมผัสระหว่าง ITO/n-Si เกิดชั้นออกไซด์บาง ๆ (interface oxide:  $\text{SiO}_x$ ) ขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างซิลิคอนกับออกซิเจนส่วนเกิน (excess oxygen) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ [11-13] โดยแสดงด้วยลักษณะของแถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดนี้ ดังในรูปที่ 6 ส่งผลให้ค่าเวลาคงตัว ซึ่งเป็นตัวแปรที่

มีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง มีค่าเพิ่มขึ้น (ความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น) จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า



รูปที่ 6 แถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดนี้ในภาวะสมดุลความร้อนของ (ก) รอยสัมผัส Al/n-Si (ข) รอยสัมผัส ITO/n-Si

ในรูปที่ 7 เป็นลักษณะสมบัติของกระแสแสง และความถี่คutoffกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ให้มีความกว้างของขั้วไฟฟ้ามักขึ้น จะได้กระแสแสงมากขึ้น แต่กลับทำให้การตอบสนองทางความถี่ลดลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าขนาดของความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทั้งสอง (กระแสแสง ที่ความเข้มแสง 15,000 lux และการตอบสนองทางความถี่) ได้จากจุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองที่ลากลงไปตัดแกนความกว้างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความถี่คutoffกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20-80  $\mu\text{m}$

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$ , ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$ , ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ที่ได้รับแรงดันไบอัส 5 V

MSM Photodetectors	Barrier Height (eV) [8]	Dark current ( $\text{pA}/\mu\text{m}^2$ ) [8]	Photocurrent [15,000 lux] (mA)	Capacitance (pF)	Cut off frequency (MHz)
ITO/n-Si/ITO	0.74	1.5	0.30	55	0.35
Al/n-Si/Al	0.72	1.3	0.05	26	1.00

ในตารางที่ 1 เป็นตารางสรุป เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงระหว่างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al พบว่าตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิดมีสมบัติพื้นฐาน (ความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสชนิดดีและแอสมีด) ที่ใกล้เคียงกัน กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่ามากกว่า Al/n-Si/Al (โดยมีค่าเป็น 6 เท่าของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al) ในขณะที่การตอบสนองทางความถี่ตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al มีค่ามากกว่า โดยมีค่าประมาณ 3 เท่า เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ ITO/n-Si/ITO เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีค่ามากกว่า

#### 4. สรุป

การสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จากขั้วไฟฟ้าโปร่งใสอินเดียมทินออกไซด์ ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล พบว่าการตอบสนองสัญญาณทางแสงแบบกระแสสลับมาจากตัวแปรที่มีนัยสำคัญในโครงสร้าง คือ การเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO ซึ่งความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้การตอบสนองทางความถี่มีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO กับชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเดียวกัน (ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า, ความยาวของขั้วไฟฟ้า และจำนวนขั้วไฟฟ้ามีค่าเป็น 40  $\mu\text{m}$ , 40

$\mu\text{m}$ , 1.5 mm และ 8 ขั้ว ตามลำดับ) ความถี่คutoff ของ ITO/n-Si/ITO จะมีค่าน้อยกว่า เพราะค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่านั่นเอง (รวมถึงผลของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนเชื่อมต่อกับสายด้วย) ความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al เกิดจากชั้นออกไซด์บาง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ และจากผลการทดลองยังพบอีกด้วย ถ้าพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงกับการตอบสนองทางความถี่ที่ลดลง จะได้ความกว้างของขั้วไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นในบทความนี้มีค่าเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณกุลวรงค์ นุตะมาน และคุณ อิศระ ศรีธนชัยที่ช่วยวัดผลการทดลอง และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อบทความนี้

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2554

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech, S. Ueamanapong and N. Atiwongsangthong, "Analysis The Suitable Indium



- Tin Oxide Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), หน้า 1213-1216, 2551
- [2] I. Srithanachai, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen, S. Supadech, “Preparation and Properties Indium Tin-Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photodetectors”, *Advanced Materials Research*, Vol. 55-57, pp. 769-772, 2008
- [3] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กุลวรางค์ นุตะมาน และ อิศระ ศรีธนะชัย, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโปร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), หน้า 1201-1204, 2551
- [4] Y. Daghan Gokdel, Ali Osman Sevim, Senol Mutlu and Arda D. Yalcinkaya, “Polymer-MEMS-Based Optoelectronic Display”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 57, No. 1, pp. 145-152, 2010
- [5] Eisuke Tokumitsu, “ITO-Channel Ferroelectric-Gate Thin Film Transistor with Large On-Current”, *International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT' 06)*, pp. 717-720, 2006
- [6] Tiberiu Mizrah and David Adler, “Operation of ITO/Si Heterojunction Solar Cells”, *Applied Physics Letters*, Vol. 29, No. 10, pp. 682-684, 1976
- [7] Surada Ueamanapong, Itsara Srithanachai, Narin Atiwongsangthong, Putapon Pengpad, Surasak Niemcharoen, Amporn Poyai and Somkiet Supadech, “Fabrication, Characterization and Analysis of ITO/n-Si Schottky Photodetector”, *The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON 2010)*, pp. 776-779, 2010
- [8] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีกระแสสูง โดยใช้ขั้วโลหะโปร่งใส”, *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 27 ฉบับที่ 1, หน้า 25-30, 2553
- [9] ธเนศ โชะเหม, มานิตา ดั่งแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด ชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมาที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง”, *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 22 ฉบับที่ 1, หน้า 13-18, 2548
- [10] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สุรชาติ เมืองอ้อ, “อุปกรณ์ตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr แบบสลิคเดียวในแนวระนาบ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), หน้า 560-563, 2550
- [11] G. Hodes, L. Thompson, J. DuBow, and K. Rajeshwar, “Heterojunction Silicon/Indium Tin Oxide Photoelectrodes: Development of Stable Systems in Aqueous Electrolytes and Their Applicability to Solar Energy Conversion and Storage”, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 105, No. 3, pp. 324 -330, 1983
- [12] H. Kobayashi, T. Lshida, K. Nakamura, Y. Nakato, H. Tsubomura, “Properties of Indium Tin Oxide Films Prepared by the Electron Beam Evaporation Method in Relation to Characteristics of Indium Tin Oxide/Silicon Junction Solar Cells”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 72, pp. 5288, 1992
- [13] T. Lshida, H Kobayashi and Y. Nakato, “Structures and Properties of Electron-Beam Evaporated Indium Tin Oxide Films as Studied by X-Ray Photoelectron Spectroscopy and Work-Function Measurements”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 73, pp. 4344, 1993

